

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210515

# 基于UML活动图的安全稳定控制装置策略代码自动实现方法

刘一民<sup>1</sup>, 颜云松<sup>2,3</sup>, 许高阳<sup>2</sup>, 董希建<sup>2,3</sup>

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210003; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211006)

**摘要:** 为提高和保障电网安全稳定控制系统控制策略(简称稳控策略)的实现效率和可靠性, 研制了一种基于UML活动图的稳控策略的自动编程实现方法和基础平台。首先, 抽象稳控策略的最小元素和动态行为元素, 提出稳控策略动态行为描述方法, 建立基于UML活动图的稳控策略模型和抽象语法树。然后, 规范稳控策略模型的存储标准及格式, 制定模型到代码的映射规则, 基于抽象语法树使用深度优先搜索算法将模型自动转化为嵌入式系统可执行代码。最后, 构建稳控策略模型至主体代码自动生成和辅助代码自动补全的软件技术框架并研发实现。结合4个大型稳控系统的新建和改造的编程案例及其成效, 验证了所提代码自动生成方法和平台工具的可行性、高效性和可靠性。

**关键词:** 安全稳定控制; 动态行为元素; 稳控策略模型; 抽象语法树; 映射规则; 代码自动生成

## A method of automatic realization of security and stability control strategy code based on a UML activity diagram

LIU Yimin<sup>1</sup>, YAN Yunsong<sup>2,3</sup>, XU Gaoyang<sup>2</sup>, DONG Xijian<sup>2,3</sup>

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China; 2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** To improve and ensure the efficiency and reliability of control strategy for power grid security and stability control system (SSC), an automatic programming realization method using a UML activity diagram for the SSC strategy is proposed and the corresponding basic platform is developed. First, the least dynamic behaviors elements of the SSC strategy are extracted to propose stability control strategies dynamic behavior description methods. The stability control model and an abstract syntax tree based on UML activity diagrams are thus established. After that, the storage standard and format of the SSC strategy model is regulated, the model-to-code mapping rules are formulated, and the model is automatically converted into embedded system executable code using depth first search based on the abstract syntax tree. Finally, a technical software framework which automatically generates the main body of code from the SSC strategy model and automatically completes auxiliary code is constructed, developed, and realized. The results of the programming cases for 4 large-scale power grid stability control system construction and renovation projects have proven the feasibility, efficiency and reliability of the proposed code automatic generation method and platform tools.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202055019A-0-0-00).

**Key words:** security and stability control; dynamic behaviors elements; SSC strategy model; abstract syntax tree; mapping rules; code automatic generation

## 0 引言

稳控系统是保障电网安全的第二道防线, 为适应电网在不同发展阶段的安全稳定运行需要, 国内

很多地区均设计建设了与电网工程配套的稳控系统<sup>[1-3]</sup>。目前, 稳控系统的控制策略软件需要按照不同地区的工程要求进行定制化开发, 由开发人员手工编写程序代码。随着电网对稳控系统的建设需求不断增加, 控制策略日益复杂, 手工开发一方面耗费了开发人员大量的时间和精力, 另一方面使得控制策略软件的准确性和运行效率过分依赖于开发人

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助“策略灵活组态的安全稳定控制系统研究”(5100-202055019A-0-0-00)

员的个人经验, 在开发中遗留的软件错误可能导致稳控系统功能失效。实际工程实施中, 电网调度部门为确保稳控系统控制策略软件的运行正确性, 还要采取策略研讨、出厂验收试验、工程数模试验、现场联调试验等管理手段, 导致管理链条增长, 管理成本增加。

显然, 若能研发一种代码自动生成方法和工具, 则能够将开发人员从具体编码过程中解放出来, 大幅提高生产效率的同时, 进一步保障软件的运行可靠性<sup>[4-5]</sup>。在工业界, 控制装置的代码自动生成研究已取得了一定进展: 文献[6-7]提出一种采用可视化嵌入式应用开发的软件设计与应用方法, 即通过图形化编程来开发应用程序, 把常用的模块做成元件库, 拖选元件绘制逻辑策略框图, 拉线实现元件之间信息传递, 使用人员不需要具备嵌入式系统开发知识和编程能力就可以完成控制策略的搭建, 但该方法只适用于固定不变的、容易抽象成标准模块的控制策略, 无法适应稳控策略复杂多变的系统。在稳控策略的描述方面, 文献[8-9]使用 E 语言描述稳控离线策略和定值, 主要应用于 EMS 系统通过对稳控策略进行在线分析和评估; 文献[10-11]提出了一种基于面向对象的建模方法, 采用状态机模型对策略表进行搜索和匹配, 能够有效提高装置策略执行效率和准确性, 但该方法只能对稳控策略表固定格式抽象建模。文献[12-13]则对主流的自动代码生成方法进行了总结归纳, 有基于模型驱动、模板、对象关系映射、文档注释和动态代理等代码生成技术, 但并未给出具体的适用于稳控装置的实现方法。另外, 针对单装置的代码自动生成方法取得了一定进展, 比如, 继电保护装置和测控装置实现基于组件开发的配套方案<sup>[14-16]</sup>, 在研发稳控装置的代码自动生成方法时, 可以予以借鉴。

本文基于可视化模型驱动的软件设计方法, 提出了一种稳控策略代码自动生成方法, 将稳控业务逻辑与实现方法解耦, 采用 XMI (XML Metadata Interchange) 存储与交换数据的稳控策略代码生成工具能够较好地满足全国各地区的稳控系统建设需要, 进一步提升了稳控装置策略实现效率和可靠性。

## 1 稳控策略描述方法

### 1.1 稳控策略元素描述

稳控策略一般以策略表和流程控制命令等方式进行描述和存储<sup>[17]</sup>。典型策略表<sup>[18-19]</sup>由事故前电网运行方式、故障元件、故障类型、潮流方式、控制措施和控制对象等元素构成; 流程控制命令则由

一系列的控制动作或逻辑判断元素组成<sup>[20-22]</sup>。为统一描述, 本文将策略表和流程控制命令元素以集合形式建立稳控策略元素集, 如式(1)一式(7)所示。

$$\text{运行方式 } M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\} \quad (1)$$

$$\text{故障元件 } E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \quad (2)$$

$$\text{故障类型 } F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (3)$$

$$\text{潮流方式 } S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (4)$$

$$\text{控制措施 } C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (5)$$

$$\text{控制对象 } O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\} \quad (6)$$

$$\text{流程控制命令 } CMD = \{cmd_1, cmd_2, \dots, cmd_n\} \quad (7)$$

实际工程依据电力系统安全稳定导则<sup>[23]</sup>选定稳控系统故障元件、故障类型的子集; 根据稳定计算分析结论制定控制策略。因此, 工程中的稳控元素是上述集合的子集, 即  $M' \in M, E' \in E, F' \in F, S' \in S, O' \in O, C' \in C, CMD' \in CMD$ 。

### 1.2 稳控策略行为描述

根据稳控策略逻辑特征, 将策略行为分解成策略触发条件、策略执行条件、控制量计算和控制措施 4 部分, 如图 1 所示。

1) 策略触发条件由系统发生故障时的运行方式  $M'$ 、元件  $E'$ 、故障  $F'$  的单个触发状态或者流程控制命令  $CMD'$  与多个防误条件  $\neg Ab$  等共同组成, 其逻辑表示如式(8)所示。

$$\text{trig} = \neg Ab \wedge ((\exists M' \wedge \exists E' \wedge \exists F') \vee \exists CMD') \quad (8)$$

策略触发条件							策略动作条件				
防误条件			策略条件				断面功率满足	潮流方向满足	同一控制周期内关元件特征量满足	其他设定条件	
故障元件启动	装置未闭锁	装置无影响策略异常	自定义条件	运行方式	元件故障	自定义条件					
				正常							
				检修	元件						
				其他	类型						
控制量计算											
周期内首次控制						周期内非首次控制					
远方策略控制					本地策略控制		前馈控制 反馈控制				
切负荷容量	切机组容量	切负荷轮次	切机组轮次	切指定对象	公式计算						查策略表
					系数	功率门槛					
控制措施											
切机		切负荷	调无功	控直流	解列线路	其他					
水电/火电/新能源/直流/抽蓄/负荷/其他											
优先级		容量比		轮次		其他					

图 1 稳控策略行为描述

Fig. 1 Behavior description of SSC strategy

2) 策略执行条件是策略行为的判断环节, 由断面潮流  $S$ 、潮流方向、功率门槛定值和元件特征量变化等元素组成, 其逻辑公式表示如式(9)所示。

$$exc(p(o)) = \begin{cases} f_s(m, e, f, s) \\ f_r(cmd) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f_s$  为典型策略表查找映射;  $f_r$  为流程控制命令映射;  $p(o)$  为控制对象  $o$  的控制量。

3) 控制量计算是控制周期采用本地或远方策略的首次控制量、首次控制后的前馈控制量和反馈控制量, 其计算公式如式(10)、式(11)所示。

$$p(o) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i(o) \\ \text{MAX}\{p_1(o), p_2(o), \dots, p_n(o)\} \end{cases} \quad (10)$$

$$calc(o) = f_j(p(o)) \quad (11)$$

当系统发生多次反馈控制, 如频率、电压、元件过载, 按照多次叠加控制, 即本控制周期总量为式(10)求和; 当系统发生多次在同一区域内的前馈控制, 则按照离线策略事先确定的原则取大控制, 即本控制周期控制总量为式(10)最大量  $\text{MAX}$ , 式(11)中  $f_j$  为控制计算量映射。

4) 控制措施是策略行为的执行环节, 将控制量按设定的规则分配到控制各个控制对象的过程, 其逻辑公式表示如式(12)所示。

$$ctrl(c) = f_c(o, p(o), type) \quad (12)$$

式中:  $f_c$  为控制措施搜索映射;  $type$  表示控制类型。

### 1.3 基于 UML 活动图的稳控策略模型定义

UML(Unified Modeling Language)活动图是描述控制系统中一系列具体动态过程的执行逻辑, 展现活动和活动之间转移的控制流, 主要包括初始结点、结点集合、控制边集和数据边集等基本元素<sup>[24]</sup>。为了更好地描述稳控策略模型, 根据稳控策略的特征对活动图进行如下形式化定义。

定义 1 策略对象

策略对象  $obj$  是模型要素的基础, 在第 1.1 节中将每种策略元素集合定义为一种对象, 同时每个对象都将映射到策略代码中的变量  $Variable$  库中, 对象映射关系如式(13)所示。

$$\forall obj \xrightarrow{map} Variable \quad (13)$$

定义 2 策略控制活动

活动  $act$  是对象的生命周期中满足一定条件时执行动作或者等待事件发生的一个阶段。将策略行为定义成一系列活动, 对策略产生相同的或者类似

的行为, 可以作为稳控决策的同一个活动, 如运行方式确定、元件故障检测等, 活动约束如式(14)所示。

$$act = \{trig, exc, calc, ctrl\} \quad (14)$$

定义 3 策略控制事件

事件是促使控制决策调整或者更改参数的特定现象, 可以触发活动之间发生转换。如控制命令可以由本地策略执行, 也可以通过发送远方命令由对侧装置执行, 事件约束如式(15)所示。

$$event(a, b): a \rightarrow b(a \in act, b \in act) \quad (15)$$

定义 4 策略活动图模型

稳控策略模型用 UML 活动图表示为一个七元组, 如式(16)所示。

$$Model = (init, act, end, Lc, Ld, xorSplit, xorJoin) \quad (16)$$

式中:  $init$  为初始活动;  $end$  为结束活动;  $Lc$  表示控制连接线;  $Ld$  表示数据连接线;  $xorSplit$  表示分支选择;  $xorJoin$  表示分支聚合。应满足以下条件。

1)  $Lc \subseteq event$ 。

2)  $Ld \subseteq \{x \cdot y \cup y \cdot x | x \in obj, y \in obj, x \neq y\}$ 。

3) 模型中只能有一个初始活动和一个结束活动, 初始活动没有输入事件并且只有一个输出事件, 结束活动只有一个输入事件但没有输出事件。

4) 模型中出现一个  $xorSplit$  时, 要有一个对应的  $xorJoin$  将从该  $xorSplit$  分支出去的执行路径合并在一起;  $xorSplit$  只有一个输入事件但可以有多输出事件,  $xorJoin$  可以有多个输入事件但只能有一个输出事件。

5) 模型中  $xorSplit$  对应的每条路径上的输出事件是互斥的, 并且所有路径上输出事件取并的结果是永真的。

### 1.4 策略模型示例

稳控控制策略活动启动时, 对控制过程进行初始化, 包括设定运行方式和元件运行参数范围等; 然后检测运行状态是否发生故障, 一旦检测到故障发生, 确定故障类型并选择本地或者远方策略; 最后, 查找控制策略并执行。

如图 2 所示, 模型示例创建若干个活动、分支选择和分支聚合, 其中包括了运行方式确定活动 1、元件检测活动 2、故障检测活动 3、分支选择 4、发送远方控制命令 5、潮流计算活动 6、策略表查询活动 7、分支聚合 8、控制措施查询活动 9 等  $act$  活动,  $init$  是由触发活动 0 开始; 分支选择 4 的  $Lc = \{event(4,5), event(4,6)\}$ , 分支聚合 9 的  $Lc = \{event(5,9), event(8,9)\}$ , 活动图的结束活动为活动 10。

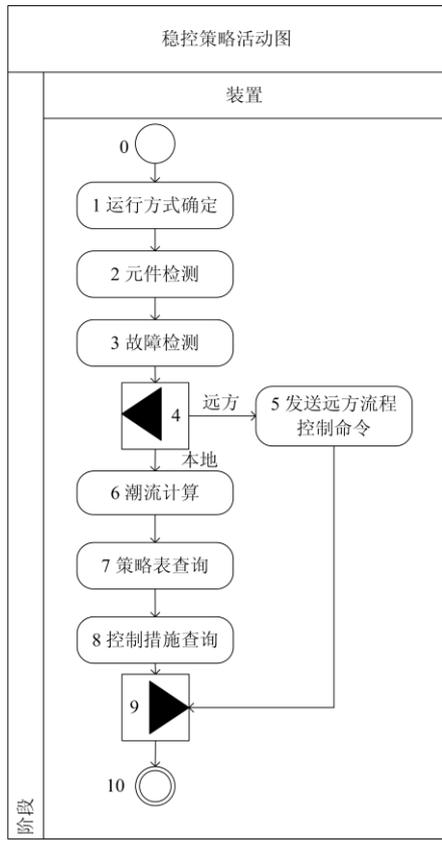


图 2 稳控策略活动图

Fig. 2 Activity diagram of SSC strategy

## 2 稳控策略代码自动生成

### 2.1 策略模型解析

为了更好地解析和存储策略模型内容, 方便 UML 活动图模型元素之间的映射, 本文采用 UML 模型中数据标准交换格式 XMI 作为稳控策略活动图的存储格式, XMI 可用于分布式异构环境的模型和数据仓库间数据交换。XMI 元素、模型元素、抽象语法树(Abstract Syntax Tree, AST)与目标代码关系如图 3 所示。

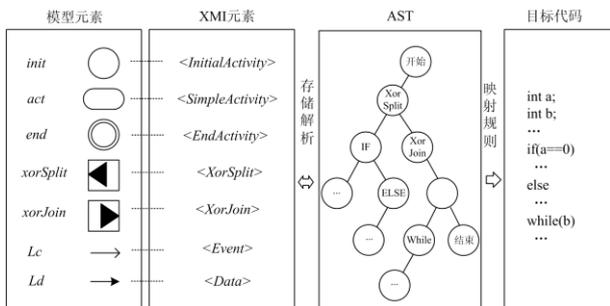


图 3 XMI 元素、模型元素、AST 与目标代码的关系图

Fig. 3 Relationship among XMI elements, model elements, AST and object code

图 3 中 XMI 是连接模型元素与 AST 的桥梁, 每种策略模型元素都对应一个固定的 XMI 标签和属性, 使用开放源代码插件 dom4j 解析 XMI 生成 AST, 其中 dom4j 提供了丰富的 XMI 应用程序接口, 具有性能优异、功能强大和极易使用的特点, 便于软件工具的开发与应用。

### 2.2 策略模型到代码的映射规则

策略模型到代码的映射规则是稳控策略代码自动生成的核心部件。映射规则分为两部分, 一部分是语句代码的映射, 另一部分是程序结构的映射。其中, 策略模型映射的内容如图 4 所示。

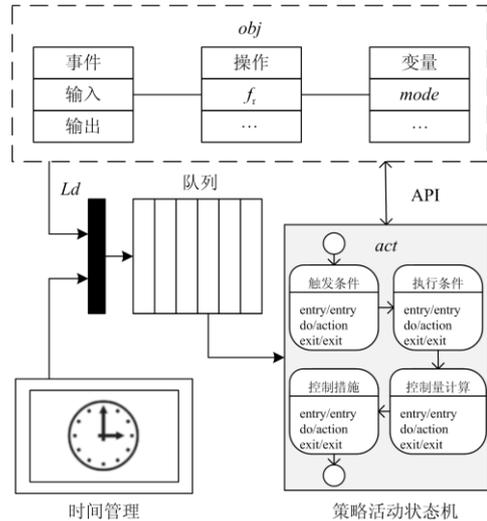


图 4 策略模型映射的内容

Fig. 4 Activity diagram mapping basis

图 4 中变量、事件和操作采用 AST 构建映射规则, 通过解析各自的 AST 进行转换。本文语句代码映射规则仅以操作为例介绍模型 AST 到目标代码 AST 的映射规则, 操作是模型调用函数/方法的过程, 如图 5 所示。

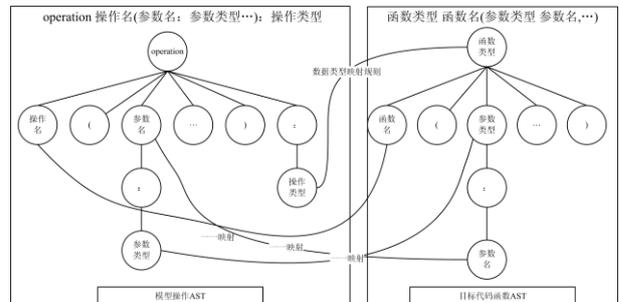


图 5 操作的映射规则

Fig. 5 Mapping rules for operations

如图 5 所示, 模型操作 AST 与目标代码函数 AST 的参数名、参数类型一一映射, 而操作类型和操作名则分别映射到函数类型和函数名。

策略模型到目标代码映射规则的第二部分程序结构映射仍采用 AST 作为转换桥梁,使用深度优先搜索算法对 AST 进行遍历。利用 AST 对策略模型中的顺序、分支和循环进行转换,顺序结构将其转换为顺序控制语句;条件分支结构将其转换为选择控制语句(如, if-else 语句);循环结构将其转换为循环控制语句(如, while 语句)。策略模型中顺序结构、分支结构和循环结构转换成语法树结构的过程如下。

1) 顺序结构:如图 6 所示,活动 A、B、C 之间是顺序关系,活动 B 由输入、输出和执行 3 部分组成,分别对应的是代码中的执行入口动作、执行出口动作和 Guard1 到 GuardN 执行内部动作。

2) 分支结构:如图 7 所示, *XorSplit* 标志着模型中分支的开始, *XorJoin* 标志着模型中此次分支的结束,两个结点中间部分对应的是 if-else 语句。

3) 循环结构:如图 8 所示,循环以 While 类型节点为根结点的子树,支持内外层循环的嵌套,若循环结束的下一个节点是另一个循环的开始,则需新增一个空节点, h1 的外层循环和 h2 的内循环对应目标代码中的 while 语句代码段。

综上,通过活动图、变量、事件和操作的映射规则,将稳控策略模型解析生成 AST 并映射到目标代码可以实现自动化处理,为后续工具开发提供了理论支持。

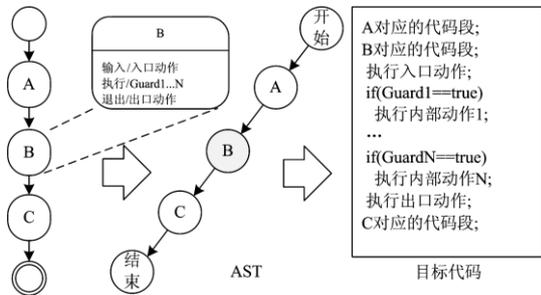


图 6 顺序结构 AST 到代码生成

Fig. 6 Sequential structure AST to code generation

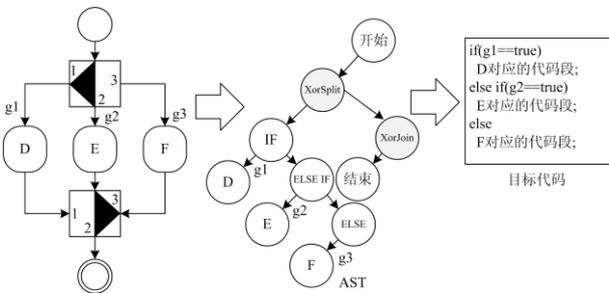


图 7 分支结构 AST 到代码生成

Fig. 7 Branch structure AST to code generation

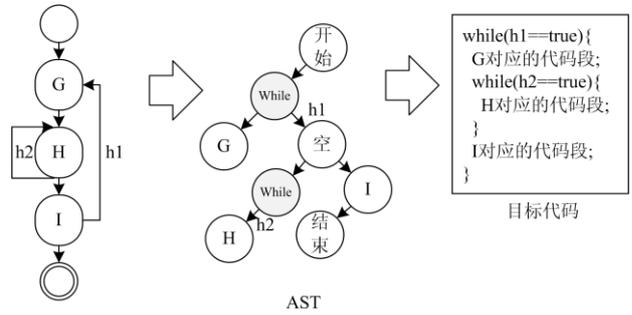


图 8 循环结构 AST 到代码生成

Fig. 8 Loop structure AST to code generation

需要说明的是,前述过程实现了稳控策略模型到功能性关键代码的自动生成,但在关键代码导入到集成开发环境编译成目标程序时,还需要考虑操作系统、编译环境和 makefile 文件制作等外部因素,进行辅助代码自动补全,可参阅有关文献[25-27],本文不再赘述。

### 3 工具实现及实例分析

#### 3.1 策略代码自动生成工具

本文基于 Eclipse 集成开发平台研发了稳控策略代码自动生成工具,该工具的总体架构如图 9 所示。

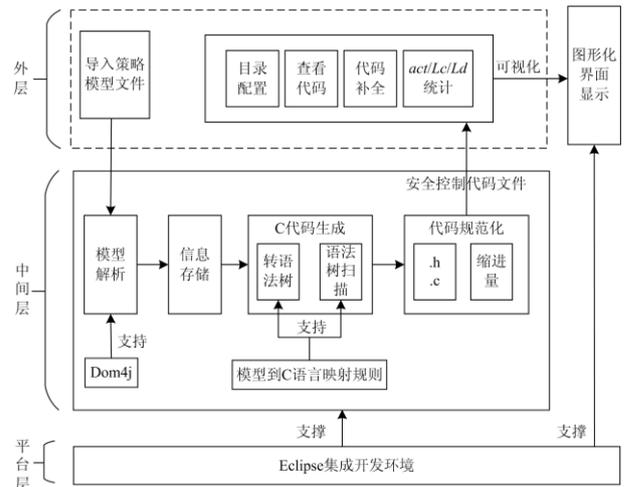


图 9 稳控策略建模及代码生成工具框架

Fig. 9 SSC strategy modeling and code generator framework

该代码生成工具分为平台层、中间层以及外层 3 个层级。

平台层:为中间层和外层提供开发环境,具有丰富的、灵活统一的接口,确保用户专注核心业务逻辑开发而无需关注底层环境的相关配置。

中间层:代码自动生成工具的核心层。由模型解析、信息存储、C 代码生成和代码规范化 4 个模块构成:模型解析模块对以 XMI 格式存储的模型进

行解析; 信息存储模块将解析得到的有用信息以直观的数据结构进行存储; C 代码生成模块根据存储的信息等将模型转成语法树结构, 然后通过抽象语法树的扫描算法实现代码的生成; 代码规范化模块主要对生成的代码进行格式处理。

外层: 外层建立辅助功能模块, 提供图形化界面, 主要包括稳控策略模型的导入、目录配置、*act/Lc/Ld* 统计和代码补全等模块。

基于该架构的代码自动生成工具, 具有显著的优势: 既可以生成代码框架, 也可以生成完整的可运行代码; 生成的代码结构清晰、冗余少; 参照统一命名规范, 便于后续的维护工作。这些优点满足电网稳控系统周期性、系统性升级改造对工具和目标代码的要求。

### 3.2 代码自动生成工具在改造工程中的实践效果

使用前述的策略建模及代码自动生成工具, 对华北、华东、西南电网 3 个稳控工程进行升级改造, 并与传统开发方法在开发、调试所用工时和程序缺陷数量等方面进行对比, 如表 1 所示。

表 1 装置改造对比表

Table 1 Devices reform comparison

厂站	装置型号	开发工时	调试工时	缺陷数
华北电网	FWK-300	12	24	3
500 kV 控制子站 A	SSP-500R	3	12	0
华东电网	SCS-500E	24	40	12
协控总站 B	SSP-500R	8	16	2
西南电网	SCS-500E	16	24	5
500 kV 控制子站 C	SSP-500R	5	8	1

基于新平台(SSP-500R), 采用上述的稳控策略代码自动生成工具生成和导入标准模型、策略对象和策略逻辑描述, 通过代码映射规则生成目标源代码。显见, 与基于早两代装置(SCS-500E、FWK-300)手工编程相比, 自动生成代码在开发、调试工时方面大幅缩短, 开发过程产生的缺陷数显著降低。经分析发现, 这些缺陷全部是在工程需求变化、设计或者策略模型搭建等阶段产生, 而不是在模型到代码转换过程产生, 可通过人为介入避免。

显然, 新平台和编程方法无论是编程效率还是可靠性, 明显优于旧平台和传统编程方法。

### 3.3 代码自动生成工具在新建工程中的实践效果

为进一步验证本文所提代码自动生成方法的高效性和鲁棒性, 采用所提方法和工具对正在实施建设的西北分区电网系统保护进行开发。该电网系统保护通过优化网内省/区电网多个超高压交流和特高压直流大型区域稳控系统, 增加部分装置, 构建了具有协控总站、协控主站、超高压交流协控子站、特高压交流协控子站、执行站五层结构的电网

系统保护骨干网架, 拟建成层次分明、判据适应性强, 体系架构与控制策略合理的源网荷储和 FACTS 协调控制系统。整个系统由 4 个协控总站、8 个协控主站、50 余个交直流协控子站和 120 余个风光水火执行站构成, 其控制规模国内最大, 也为本文提出的安全稳控代码自动生成方法的代码生成工具实践提供了良好的基础和条件。

从各个控制层级中依次挑选具有代表性的 6 个主站、18 个子站、26 个执行站的稳控装置进行开发, 对 *act*、*Lc*、*Ld* 统计如图 10 所示。

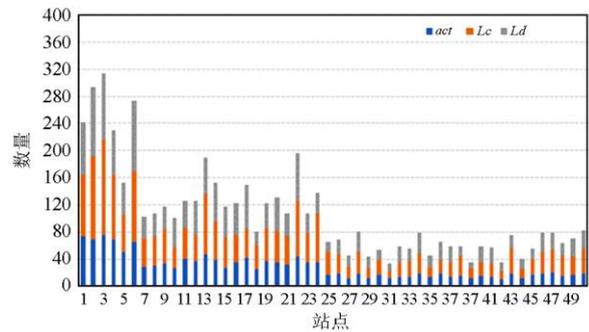


图 10 策略模型 *act*、*Lc*、*Ld* 统计图

Fig. 10 Numbers of *act*, *Lc*, *Ld* of strategy model

可见, 3 种类型站点的 *act*、*Lc*、*Ld* 规模呈现出站点策略功能复杂度(主站 > 子站 > 执行站)同样的规律, 但从中也存在 2 个子站的规模超过主站, 通过分析发现这 2 个站的  $(Lc+Ld)/act$  数量比达到 4, 表示模型中围绕着各个活动的控制连接线和数据连接线分支多且复杂。证明所选站点符合工程实际且具有代表性。

代码自动生成和补全统计如图 11 所示。

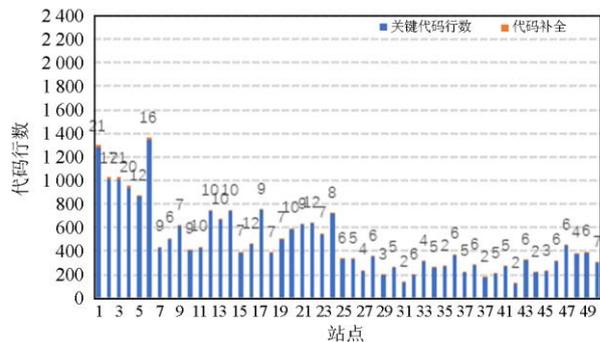


图 11 代码自动生成及补全统计图

Fig. 11 Statistics of automatic code generation and completion

可见, 策略模型自动生成代码编译生成目标程序所需的代码补全数量仅占关键代码行数的 1%~3%, 证明模型到自动生成代码比例高, 可大幅缩短程序开发周期。

目标程序装载到装置后, 经过装置集成测试和出厂测试, 获得的软件缺陷归整到代码行数如图 12 所示。

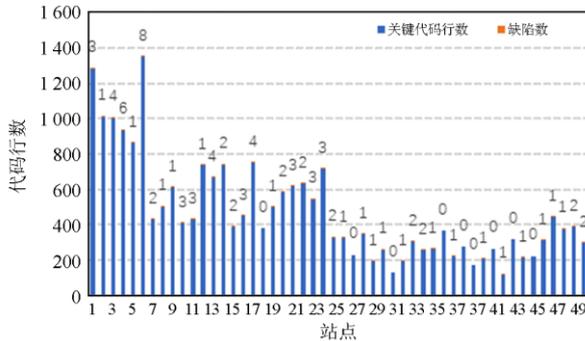


图 12 代码自动生成及缺陷统计图

Fig. 12 Statistics of automatic code generation and defects

根据各站点软件缺陷数  $defect$ 、关键代码行数  $keycode$ , 计算整个系统开发的平均缺陷率如式(17)所示, 即每千行代码缺陷率为 2.06‰, 满足软件能力成熟度模型 CMM3 的要求(CMM3 级 2.39‰)。

$$rate = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{defect(i)}{keycode(i)} = 2.06‰ \quad (17)$$

综上所述, 与传统开发方法相比, 新方法无论是工程开发效率, 还是自动生成代码的正确性, 乃至代码长周期运行的可靠程度, 都得到了大幅提升。

## 4 结论

现代电力系统特性正在并将持续发生深刻变化, 对电网运行控制和故障防御体系建设提出了前所未有的挑战。在较长时期内, 稳控系统仍将是我国电网安全稳定运行不可或缺的重要设施, 电网稳控策略编程是一项基础性工作, 新形势下固守人工低效率的编程方式并非明智之举。本文提出了一种稳控策略代码自动实现方法并开发了平台工具, 经过改造和新建工程的实践验证, 可以大幅提升电网稳控策略工程化编程的效率和可靠性。此方法和相关工具将为我国电力系统稳控专业正在大力推行的稳控装置标准化工作奠定良好基础, 对不确定性环境下电网安全稳定自适应闭环紧急控制迈向工程实用化也将大有裨益。

## 参考文献

[1] 陈兴华, 李峰, 陈睿, 等. 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 159-166.  
CHEN Xinghua, LI Feng, CHEN Rui, et al. Risk assessment of power grid operation considering second

and third defense line of security and stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 159-166.

[2] 李祖明, 张星宇, 陈松林, 等. 安稳系统中风电脱网风险在线评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 162-169.  
LI Zuming, ZHANG Xingyu, CHEN Songlin, et al. On-line evaluation method of wind farm off-grid risk in power system stability control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 162-169.

[3] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.  
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[4] ZHAO Jie, ZHAO Rongcai. Code generation for distributed-memory architectures[J]. Computer Journal, 2016, 59(1): 119-132.

[5] ALBERT M, CABOT J, GÓMEZ C, et al. Automatic generation of basic behavior schemas from UML class diagrams[J]. Software & Systems Modeling, 2010, 9(1): 47-67.

[6] 陈宏君, 刘克金, 冯亚东, 等. 新一代保护测控装置配套工具软件设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 92-96.  
CHEN Hongjun, LIU Kejin, FENG Yadong, et al. Design and application of supporting tool software for new generation protection and measuring-control devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 92-96.

[7] 王旭宁, 郭晓宁, 陈玉峰, 等. 一种通用的可视化嵌入式应用开发平台的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 151-155.  
WANG Xuning, GUO Xiaoning, CHEN Yufeng, et al. Design and implementation of a universal visual embedded application development platform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 151-155.

[8] 夏小琴, 鲍颜红, 任先成, 等. 计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 24-30.  
XIA Xiaoqin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Auxiliary decision-making of dispatching plan considering static security and transient stability constrains[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 24-30.

[9] 王胜明, 徐泰山, 陈刚, 等. 电网安全稳定控制系统当值策略可实施评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 126-133.  
WANG Shengming, XU Taishan, CHEN Gang, et al. Practicability assessment method of duty strategy for security and stability control system in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 126-133.

- [10] 邵伟, 周晓宁, 王胜明, 等. 一种面向对象的稳控策略建模方法[J]. 智能电网, 2014, 30(9): 20-25.  
SHAO Wei, ZHOU Xiaoning, WANG Shengming, et al. An object-oriented stability control strategy modeling method[J]. Smart Grid, 2014, 30(9): 20-25.
- [11] 李力, 李志平, 王亮, 等. 稳定控制装置中策略搜索匹配状态机模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 86-89.  
LI Li, LI Zhiping, WANG Liang, et al. A finite-state machine model for strategy table search and match of standardized stability control device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 86-89.
- [12] 王博, 舒新峰, 王小银, 等. 自动代码生成技术的发展现状与趋势[J]. 西安邮电大学学报, 2018, 23(3): 1-11.  
WANG Bo, SHU Xinfeng, WANG Xiaoyin, et al. Current situation and trend of automatic code generation technology[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2018, 23(3): 1-11.
- [13] 王博, 华庆一, 舒新峰. 一种基于模型和模板融合的自动代码生成方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(22): 69-74.  
WANG Bo, HUA Qingyi, SHU Xinfeng. An automatic code generation method based on fusion of model and template[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(22): 69-74.
- [14] 祁忠, 施志良, 李枫, 等. 安全稳定控制管理系统的研制及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 122-127.  
QI Zhong, SHI Zhiliang, LI Feng, et al. Development and application of the security stability control management system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 122-127.
- [15] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.  
CHEN Feijian, LÜ Yuanshuang, FAN Guosheng. Automatic test system of relay protection device for smart substation based on information fusion technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- [16] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.  
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.
- [17] HUANG Kun, LI Yanman, ZHANG Xiaoyan, et al. Research on power control strategy of household-level electric power router based on hybrid energy storage droop control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 178-190.
- [18] 电网安全自动装置标准化设计规范: Q/GDW 11356—2014[S].  
Standardization design specification of security automatic equipment for power system: Q/GDW 11356—2014[S].
- [19] 电网安全自动装置信息规范: Q/GDW 11632—2016[S].  
Information specification of security automatic equipment for power system: Q/GDW 11632—2016[S].
- [20] OO M E, THUZAR M. Transmission capacity improvement using unified power flow controller with new control strategy[J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 2021, 10(3): 225-232.
- [21] BHUSHAN K B, INDRASEN V, VASUDEVAN AIDU P. A new design of the distribution custom power controllers for mitigation of power quality problems[J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 2014, 3(1): 122-132.
- [22] STEFFI M S, VISITHA P, KAMAL C. Automatic irrigation system using programmable logic controller[J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 2015, 1(1): 246-252.
- [23] 电力系统安全稳定导则: GB/T 38755—2019[S].  
Code on security and stability for power system: GB/T 38755—2019[S].
- [24] 顿敦, 李哲, 秦红霞, 等. 基于 UML 的稳定控制系统逻辑模块软件设计[J]. 电力系统自动化设备, 2007, 27(2): 85-89.  
DUN Dun, LI Zhe, QIN Hongxia, et al. UML-based software design for logic unit of stability control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 85-89.
- [25] BIRKEN K. Building code generators for DSLs using a partial evaluator for the Xtend language[C] // International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Springer, 2014, Berlin, Heidelberg.
- [26] 杨志斌, 袁胜浩, 谢健, 等. 一种同步语言多线程代码自动生成工具[J]. 软件学报, 2019, 30(7): 1980-2002.  
YANG Zhibin, YUAN Shenghao, XIE Jian, et al. Multi-threaded code generation tool for synchronous language[J]. Journal of Software, 2019, 30(7): 1980-2002.
- [27] VISWANATHAN S E, SAMUEL P. Automatic code generation using unified modeling language activity and sequence models[J]. IET Software, 2016, 10(6): 164-172.

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-12-07

作者简介:

刘一民(1981—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为继电保护运行和管理; E-mail: hbdwjdbh@163.com

颜云松(1981—), 男, 博士在读, 高级工程师, 研究方向为电网安全稳定控制; E-mail: yanyunsong@sgepri.sgcc.com.cn

许高阳(1983—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网安全稳定控制。E-mail: xugaoyang@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)